Chapitre 6

Réactions nucléaires

6.1 Généralités

6.1.1 Définitions

Un atome est constitué d'électrons et d'un noyau, lui-même constitué de protons et de neutrons appelés *nucléons*. Le *nombre de masse*, noté A, est le nombre de nucléons d'un noyau. Le *nombre de charge*, noté Z, est le nombre de protons de ce noyau.

Le *nombre de neutrons* est donc $N = A - Z$. L'atome étant électriquement neutre, Z désigne également le nombre de ses électrons ; il est aussi appelé *numéro atomique* de l'atome.

Un *élément chimique* est l'ensemble des atomes de même numéro atomique Z. On connaît actuellement une centaine d'éléments chimiques.

Un *nucléide* est l'ensemble des atomes de noyau identique, ou l'ensemble de ces noyaux. Deux noyaux d'un même nucléide ont le même nombre de charge Z et le même nombre de masse A. On note ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ un nucléide de l'élément X. Actuellement, on connaît environ 1500 nucléides naturels ou artificiels.

Les différents nucléides d'un même élément chimique sont dits *isotopes*. Deux isotopes ont le même nombre de charge Z mais un nombre de masse A différent. Les noyaux des isotopes diffèrent par leur nombre de neutrons N.

Exemple 6.1 Les nucléides ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ et ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ sont deux nucléides différents du même élément chimique carbone, ils sont isotopes.

6.1.2 Lois de conservation

Les particules qui participent à une réaction nucléaire forment un système isolé. Les grandeurs suivantes, relatives à ce système, sont conservées lors de la réaction :

- Le nombre de nucléons A.
- La charge électrique et donc aussi le nombre de charge Z.
- La somme de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie au repos E_0.

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.COM

- La quantité de mouvement $\vec{p}$.

6.2 La radioactivité

6.2.1 Ce qu'on entend par radioactivité

En 1896, Henri Becquerel découvrit que l'uranium et ses composés émettent continuellement un rayonnement. Pierre et Marie Curie poursuivant les travaux commencés par Becquerel ont donné à ce phénomène le nom de *radioactivité*.

Définition *On appelle radioactivité la transformation spontanée d'un noyau atomique au cours de laquelle un rayonnement est émis.*

On rencontre de nombreux éléments radioactifs naturels.

- L'uranium 238 est un des éléments radioactifs naturels les plus importants.
- Le radon 222 est un gaz radioactif naturel, issu des roches et terrains contenant de l'uranium.
- Le corps humain contient également des éléments radioactifs : le potassium 40 et le carbone 14.

Parmi les 1500 nucléides connus, il en existe environ 325 naturels :

- 274 sont stables, leur noyau ne se modifie pas spontanément au cours du temps ;
- 51 sont instables car ils sont radioactifs, leur noyau est susceptible à tout moment de subir une transformation radioactive.

Si on classe ces nucléides stables en fonction des nombres qui les caractérisent, N et Z, on peut tracer la *courbe de stabilité* (figure 6.1).

Les noyaux instables radioactifs se situent :

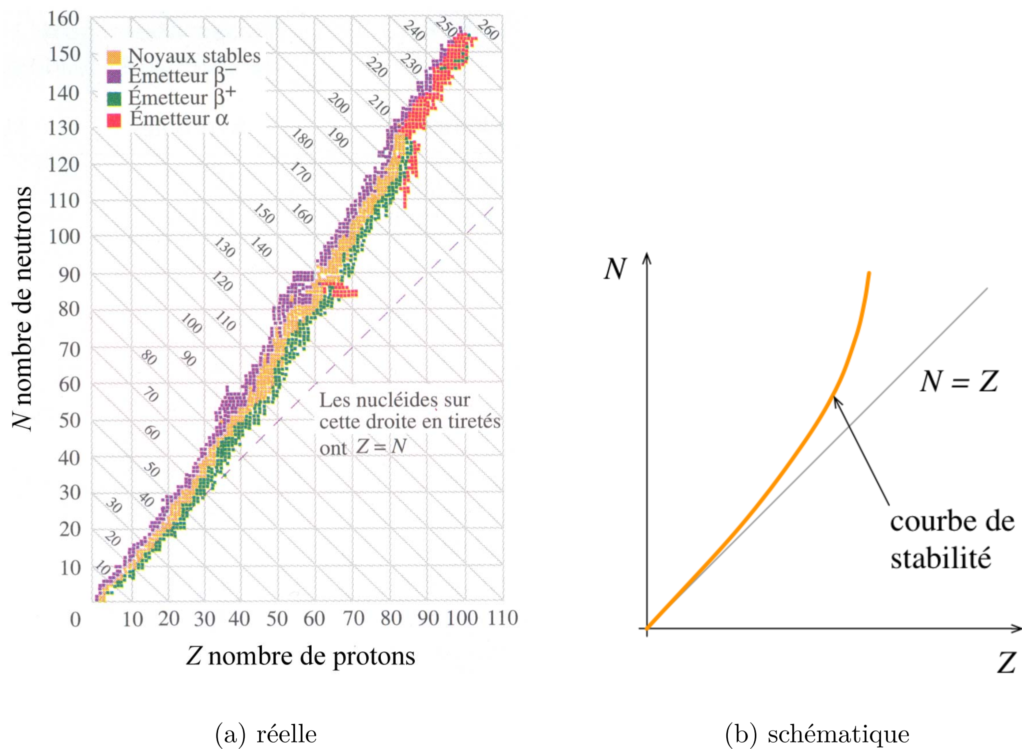
- de part et d'autre de la courbe de stabilité ; ces nucléides possèdent un excès ou un défaut de neutrons ;
- au-delà du dernier nucléide stable ($Z = 82$), ces nucléides possèdent un excès de nucléons. Ce sont les noyaux lourds.

6.2.2 Les différents modes de désintégration

La radioactivité α

La radioactivité α est l'émission de noyaux d'hélium ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ par certains noyaux. Les noyaux d'hélium sont aussi appelés particules α ou rayons α.

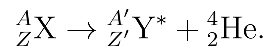
Les noyaux émetteurs α ont des nombres de masse et de charge élevés ($A > 200$, $Z > 82$) ; ce sont des noyaux trop lourds et donc instables.



(a) réelle (b) schématique

Figure 6.1 – Courbe de stabilité

La radioactivité α se traduit par une réaction nucléaire représentée par l'équation :

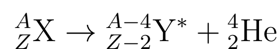


$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A'}_{Z'}\mathrm{Y}^{*} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}. $$

A' et Z' sont reliés à A et à Z par les règles de conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique :

$$ A = A' + 4 $$
$$ Z = Z' + 2. $$

On obtient alors :



$$ \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y}^{*} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}} $$

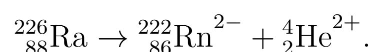
Exemple : ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn}^{*} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

Le nucléide X est appelé le noyau « père », Y est le noyau « fils ». La particule α est éjectée du noyau avec une certaine énergie cinétique. La désintégration du noyau lourd rapproche le noyau fils de la courbe de stabilité (figure 6.2).

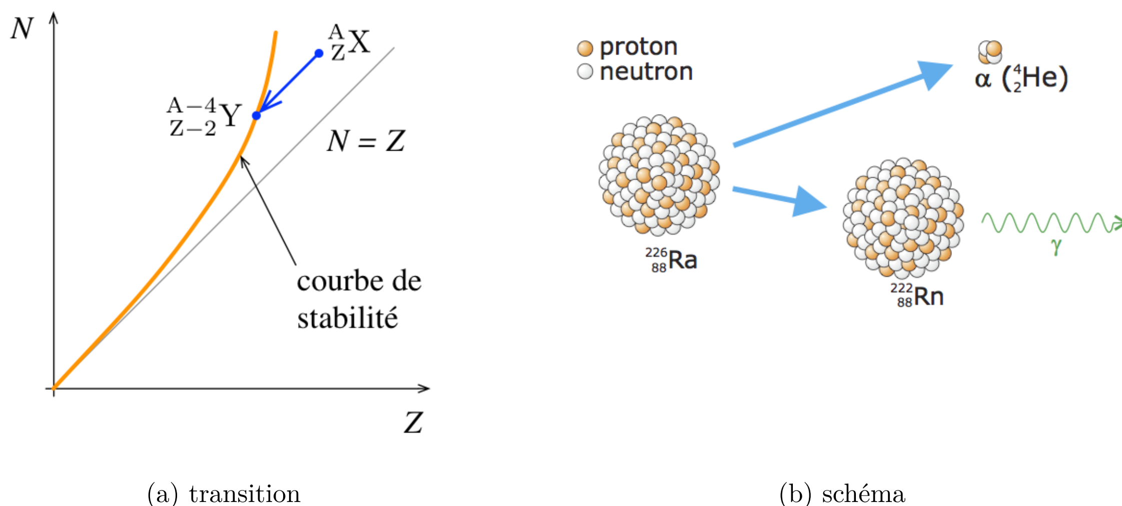
L'astérisque (*) indique que le noyau fils peut être émis dans un état excité, qui donne lieu ultérieurement à un rayonnement γ.

Remarque :

Pour un atome radioactif, la réaction nucléaire de désintégration ne porte que sur les noyaux. Le cortège électronique de l'atome n'est pas modifié. De ce fait, dans l'écriture de la réaction nucléaire, X est un noyau. Sinon, on écrirait par exemple, pour les atomes et les ions :



$$ {}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn}^{2-} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}^{2+}. $$



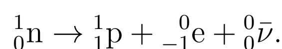
(a) transition (b) schéma

Figure 6.2 – Désintégration α d'un noyau lourd

La radioactivité β^-

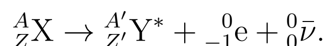
La radioactivité β^-, encore appelée rayonnement β^-, est l'émission d'électrons par certains noyaux.

La désintégration β^- se produit pour des nucléides instables trop riches en neutrons. Elle résulte de la désintégration, dans le noyau, d'un neutron qui se transforme en un proton avec émission d'un électron et d'un *antineutrino* :



$$^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}.$$

La réaction nucléaire β^- est représentée par l'équation :



$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A'}_{Z'}\mathrm{Y}^* + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}.$$

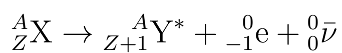
L'existence de l'antineutrino fut postulée par Wolfgang Pauli pour rétablir la conservation de l'énergie lors de la désintégration β^-. En effet, l'étude du bilan énergétique de cette réaction nucléaire montre que l'énergie du noyau père est toujours supérieure à la somme des énergies du noyau fils et de l'électron ; l'antineutrino emporte une partie de l'énergie initiale.

L'antineutrino est une particule sans charge, sa masse au repos est quasiment nulle. Il est très difficile de le détecter car il n'interagit que très faiblement avec la matière.

La conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique relient respectivement A à A' et Z à Z' :

$$A = A'$$
$$Z = Z' - 1.$$

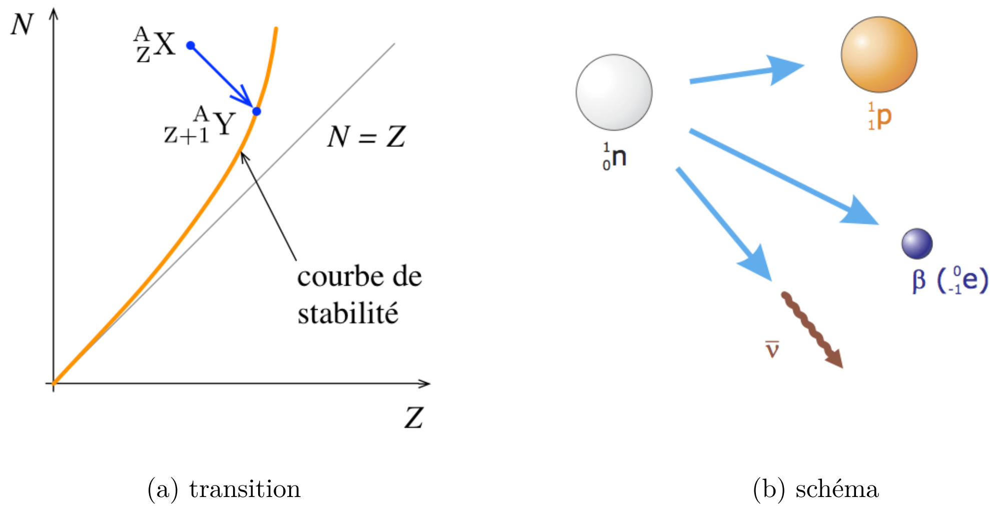
On obtient alors :



$$\boxed{^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}_{Z+1}^{\;\;A}\mathrm{Y}^* + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}}$$

Exemple : $^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N}^* + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$.

Les noyaux situés à gauche de la courbe de stabilité se désintègrent par émission β^- ; cette désintégration rapproche le noyau fils de la courbe de stabilité (figure 6.3).



(a) transition (b) schéma

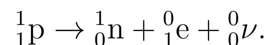
Figure 6.3 – Désintégration β^-

Le noyau fils peut être émis dans un état excité et l'électron est éjecté avec une énergie cinétique plus ou moins importante.

La radioactivité β^+

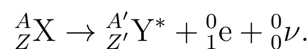
La radioactivité β^+, encore appelée rayonnement β^+, est l'émission de *positrons* par certains noyaux.

La radioactivité β^+ se produit pour des nucléides obtenus artificiellement au laboratoire. C'est pourquoi on la qualifie de radioactivité artificielle, elle est caractéristique des noyaux trop riches en protons. Elle résulte de la désintégration, dans le noyau, d'un proton qui se transforme en un neutron avec émission d'un positron et d'un *neutrino* :



$${}^{1}_{1}\mathrm{p} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{0}_{1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu.$$

La réaction nucléaire β^+ est représentée par l'équation :



$${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A'}_{Z'}\mathrm{Y}^{*} + {}^{0}_{1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu.$$

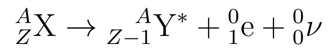
Le positron est une particule de masse égale à celle de l'électron mais de charge opposée. L'existence du neutrino fut postulée pour rétablir la conservation de l'énergie lors de la désintégration β^+. Le neutrino est une particule sans charge, sa masse au repos est quasiment nulle. Il est très difficile de le détecter car il n'interagit que très faiblement avec la matière.

Remarque : le neutrino et l'antineutrino de même que l'électron et le positron forment des couples particule-antiparticule.

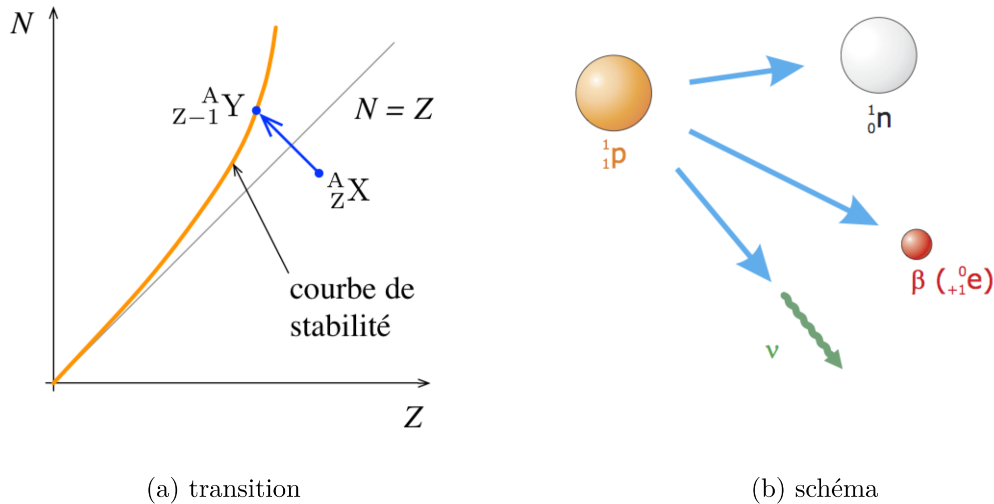
En tenant compte de la conservation du nombre de nucléons et du nombre de charge, on obtient les relations suivantes :

$$A = A'$$
$$Z = Z' + 1.$$

D'où l'équation de la réaction :



$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}_{Z-1}^{\ \ A}\mathrm{Y}^{*} + {}^{0}_{1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu $$



(a) transition

(b) schéma

Figure 6.4 – Désintégration β^{+}

Exemple : ${}^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si}^{*} + {}^{0}_{1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu$.

Les noyaux situés à droite de la courbe de stabilité se désintègrent par émission β^{+} ; cette désintégration rapproche le noyau fils de la courbe de stabilité (figure 6.4).

Le noyau fils est émis ou non dans un état excité ; le positron est éjecté avec une énergie cinétique plus ou moins importante.

L'émission γ

L'émission γ est une émission de rayonnements électromagnétiques de très courtes longueurs d'onde, inférieures à 10^{-11} m. Les photons γ qui constituent ces rayonnements ont des énergies très élevées, supérieures à 100 keV.

À la suite d'une désintégration α, β^{-} ou β^{+}, le noyau fils est émis dans un état excité. Il retrouve son état fondamental en émettant un ou plusieurs photons de haute énergie. Un photon n'a ni charge électrique ni masse au repos ; il est caractérisé par $Z = 0$ et $A = 0$.

Au cours de l'émission γ, le nucléide se conserve :



$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{Y}^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{Y} + \text{un ou plusieurs photons } \gamma $$

Le rayonnement γ est très pénétrant. Il peut traverser plusieurs dizaines de centimètres de plomb, ou plusieurs mètres de béton.

6.2.3 La décroissance radioactive

Désintégration d'un noyau radioactif

La transformation d'un noyau instable en un autre noyau n'est pas un processus de « vieillissement » continu mais se passe d'un seul coup ; une telle transformation nucléaire est appelée *désintégration*.

Il est impossible de prévoir la date de la désintégration d'un noyau particulier. Sur un ensemble de noyaux instables identiques, il est impossible de prévoir lesquels de ces noyaux vont se désintégrer à une date donnée. Le phénomène de la désintégration d'un noyau radioactif est donc *imprévisible* et *aléatoire*.

Vu le caractère aléatoire de la désintégration, il est impossible de trouver une loi qui décrirait le comportement d'un seul noyau. On peut cependant prévoir avec précision l'évolution *statistique* d'un grand nombre de noyaux identiques.

La loi de décroissance radioactive

Considérons un échantillon contenant N noyaux radioactifs d'un nucléide donné à la date t. Le phénomène de désintégration va provoquer la décroissance du nombre de noyaux.

Pendant un très court intervalle de temps Δt, le nombre de noyaux varie de ΔN. Le nombre de noyaux ayant subit une désintégration pendant cet intervalle de temps est $-\Delta N$.

Remarque : le signe moins est nécessaire car ΔN est négatif.

La probabilité de désintégration pendant l'intervalle de temps Δt est :

$$\text{probabilité} = \frac{-\Delta N}{N}.$$

Comme la désintégration n'est pas un processus de « vieillissement » , cette probabilité ne varie pas au cours du temps. Elle est proportionnelle à l'intervalle de temps Δt :

$$-\frac{\Delta N}{N} \sim \Delta t \Rightarrow -\frac{\Delta N}{N} = \lambda\,\Delta t$$

où λ est un coefficient de proportionnalité appelée *constante radioactive*. Elle représente la probabilité de désintégration par unité de temps, s'exprime en s^{-1} et ne dépend que du nucléide. On obtient ainsi :

$$\frac{1}{N}\,\Delta N = -\lambda\,\Delta t.$$

Soit N_0 le nombre de noyaux présents à l'instant $t = 0$. On peut relier N à N_0 en passant à la limite $\Delta t \to 0$ et en intégrant entre $t = 0$ et t :

$$\int_{N_0}^{N} \frac{1}{N}\,\mathrm{d}N = \int_0^t (-\lambda)\,\mathrm{d}t.$$

Le calcul intégral donne :

$$\big[\ln N\big]_{N_0}^{N} = \big[-\lambda\,t\big]_0^t$$

d'où :

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda\,t \Rightarrow \ln\frac{N}{N_0} = -\lambda\,t.$$

En appliquant à cette relation la fonction exponentielle :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

on obtient la *loi de décroissance radioactive.*

Énoncé *Le nombre $N(t)$ de noyaux radioactifs contenus dans un échantillon varie suivant la loi :*

$$\boxed{N(t) = N_0\, e^{-\lambda t}} \tag{6.1}$$

où λ est la constante radioactive du nucléide et N_0 le nombre de noyaux initialement présents.

La demi-vie d'un nucléide

Un nucléide radioactif est le plus souvent caractérisé par sa *demi-vie* $t_{1/2}$ (ou période radioactive) plutôt que par sa constante radioactive λ.

Définition *La demi-vie (ou période radioactive) d'un nucléide est l'intervalle de temps au bout duquel la moitié des noyaux initialement présents ont subi une désintégration.*

La demi-vie varie d'une fraction de seconde jusqu'à des milliards d'années selon le nucléide considéré.

Pour trouver une relation entre la demi-vie $t_{1/2}$ et la constante radioactive λ, on écrit, pour $t = t_{1/2}$:

$$\begin{aligned} N(t_{1/2}) &= \frac{N_0}{2} \\ N_0\, e^{-\lambda\, t_{1/2}} &= \frac{N_0}{2} \\ e^{-\lambda\, t_{1/2}} &= \frac{1}{2} \\ -\lambda\, t_{1/2} &= \ln\frac{1}{2} = -\ln 2 \end{aligned}$$

et finalement :

$$\boxed{t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}}$$

Pour chaque intervalle de temps correspondant à une demi-vie, le nombre de noyaux est divisé par deux (figure 6.5).

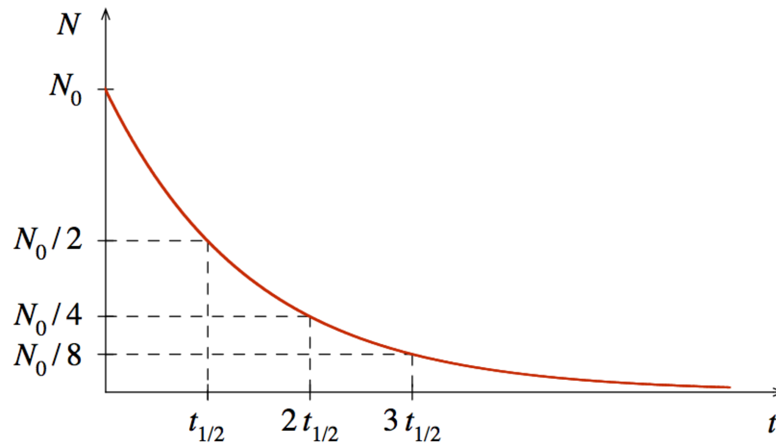


FIGURE 6.5 – Loi de décroissance radioactive

6.2.4 Applications de la loi de décroissance

Activité d'un échantillon radioactif

Définition *L'activité A à une date t d'un échantillon contenant N noyaux radioactifs est définie comme étant le nombre de noyaux qui se désintègrent par seconde :*

$$A(t) = -\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}.$$

Dans le système international, l'unité d'activité est le *becquerel* (Bq). Un becquerel correspond à une désintégration par seconde.

En utilisant la relation (6.1) il vient :

$$\boxed{A(t) = \lambda\, N(t)}$$

L'activité est proportionnelle au nombre de noyaux présents et varie donc suivant la même loi exponentielle. En effet, avec :

$$A(t) = \lambda\, N_0\, e^{-\lambda\, t}$$

et en définissant l'activité initiale $A_0 = \lambda\, N_0$ on a :

$$\boxed{A(t) = A_0\, e^{-\lambda\, t}}$$

L'activité d'un échantillon de masse m, de masse molaire atomique M et de demi-vie $t_{1/2}$ peut être calculée en utilisant :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

et :

$$N = N_A\, \frac{m}{M}$$

ce qui permet d'écrire :

$$A = \frac{\ln 2\, N_A\, m}{t_{1/2}\, M}$$

où N_A est le nombre d'Avogadro.

Exemple 6.2 Le calcul de l'activité de 1 g de ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ de masse molaire 226 g/mol et de demi-vie 1600 ans donne $A = 3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq. Cette valeur correspond au *curie* (Ci), ancienne unité de l'activité.

La datation en géologie

Plusieurs éléments radioactifs peuvent être utilisés pour dater les roches. On considère ici l'exemple de la *datation* par le plomb.

Le plomb ordinaire non radioactif est un mélange des isotopes ${}^{204}\mathrm{Pb}$, ${}^{206}\mathrm{Pb}$, ${}^{207}\mathrm{Pb}$ et ${}^{208}\mathrm{Pb}$. Les différentes désintégrations radioactives des isotopes de l'uranium et du thorium produisent tous les isotopes du plomb à l'exception de l'isotope ${}^{204}\mathrm{Pb}$.

Si un échantillon ne contient pas l'isotope ${}^{204}\mathrm{Pb}$, cela indique que le plomb présent a été produit par désintégration radioactive. L'échantillon peut alors servir à la datation.

On considère un échantillon d'une roche contenant l'isotope ${}^{206}\mathrm{Pb}$ qui provient des désintégrations successives de l'uranium ${}^{238}\mathrm{U}$. Soient N et N' les nombres de noyaux respectivement d'uranium et de plomb à un instant t donné. À l'instant $t = 0$, lors de la formation de la roche, l'échantillon contient N_0 noyaux d'uranium et aucun noyau de plomb.

La désintégration d'un noyau d'uranium produit un noyau de plomb de sorte que la somme $N + N'$ reste constante au cours du temps :

$$N_0 = N + N' = \left(1 + \frac{N'}{N}\right) N = (1 + r)\, N$$

où $r = N'/N$. Par application de la loi de décroissance il vient :

$$N_0 = (1 + r)\, N_0\, e^{-\lambda t}$$

ce qui permet d'avoir :

$$(1 + r) = e^{\lambda t}.$$

La demi-vie de l'uranium ${}^{238}\mathrm{U}$ est $4{,}5 \cdot 10^9$ ans, λ est donc connu. On peut calculer t connaissant la valeur de r à cette date.

Exemple 6.3 Pour un échantillon on mesure $r = 0{,}8$. Un calcul permet de conclure qu'il s'est écoulé $3{,}8 \cdot 10^9$ années depuis la formation de l'échantillon.

La datation en archéologie

On peut aussi dater l'âge d'une matière animale ou végétale grâce aux éléments radioactifs. L'isotope ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ du carbone, radioactif β^-, de demi-vie $t_{1/2} = 5730$ ans, est présent dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone, en proportion infime mais constante par rapport à l'isotope ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$:

$$r_0 = \frac{N({}^{14}_{6}\mathrm{C})}{N({}^{12}_{6}\mathrm{C})} \simeq 10^{-12}.$$

Les végétaux absorbent le dioxyde de carbone atmosphérique et fixent l'isotope 14 du carbone dans leur tissu. Tous les êtres vivants consommant des plantes absorbent également cet isotope. Au cours de leur vie, végétaux, animaux et humains en contiennent une proportion

constante r_0. Après la mort, l'isotope ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ n'est plus absorbé. Sa teneur diminue au rythme des désintégrations radioactives.

La mesure de l'activité d'un échantillon permet d'évaluer le rapport r et d'en déduire la date de sa mort. En effet :

$$r = r_0\, e^{-\lambda t}.$$

La mesure de ce rapport r sur un objet ancien permet de dater cet objet.

Exemple 6.4 La mesure de l'activité d'une momie dans un sarcophage donne un rapport $r = 6 \cdot 10^{-13}$. Un calcul donne $t = 4222\,\text{ans}$. La momie est dans le sarcophage depuis 4222 années.

6.3 Réactions nucléaires

Lors d'une réaction nucléaire, les nucléons initialement présents sont « regroupés » de façon différente. Les nucléons qui participent aux réactions sont soit libres, soit les constituants des noyaux. Le nombre de protons et le nombre de neutrons ne varient pas. Contrairement à la radioactivité, ces réactions sont *provoquées*.

6.3.1 Réactions exothermiques

D'après le principe de la conservation de l'énergie, l'énergie totale des produits d'une réaction nucléaire est égale à l'énergie totale des réactifs. Il est à rappeler que l'énergie totale est la somme de l'énergie au repos E_0 et de l'énergie cinétique E_c.

Une réaction nucléaire est *exothermique* lorsque l'énergie cinétique des produits est supérieure à celle des réactifs. Il en suit que l'énergie au repos doit diminuer lors d'une telle réaction (figure 6.6). L'*énergie libérée* E au cours de la réaction s'obtient par :

$$\boxed{E = E_0(\text{réactifs}) - E_0(\text{produits})}$$

Elle est égale à l'augmentation de l'énergie cinétique.

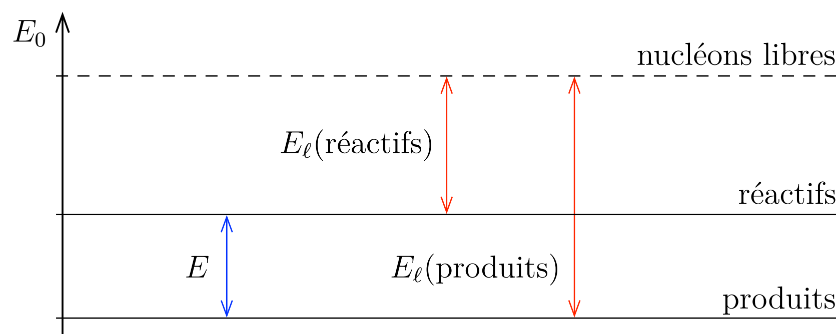


FIGURE 6.6 – Schéma énergétique d'une réaction nucléaire

6.3.2 Énergie de liaison

À l'intérieur d'un noyau, les nucléons sont confinés dans un très petit espace. La répulsion électromagnétique intense des protons devrait faire éclater le noyau, mais les nucléons s'attirent par interaction forte. Cette interaction, dont la portée n'excède pas la taille du noyau, est identique entre tous les nucléons, qu'ils soient protons ou neutrons.

Énergie de liaison d'un noyau

Les nucléons d'un noyau sont fortement liés de sorte qu'il faut fournir de l'énergie pour les séparer, c'est-à-dire pour « casser » leurs liaisons.

Définition *L'énergie de liaison d'un noyau, que l'on note E_ℓ, est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pris au repos pour le dissocier en ses différents nucléons obtenus libres et immobiles.*

C'est l'énergie au repos du noyau qui tient compte de son énergie de liaison. Puisqu'il faut fournir de l'énergie au noyau pour le dissocier, l'énergie au repos des nucléons libres est supérieure à l'énergie au repos du noyau. L'énergie de liaison d'un noyau ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ s'écrit :

$$\begin{aligned} E_\ell &= \sum E_0(\text{nucléons}) - E_0(\mathrm{X}) \\ &= Z\,E_0(\text{proton}) + (A-Z)\,E_0(\text{neutron}) - E_0(\mathrm{X}). \end{aligned}$$

En utilisant la relation d'Einstein, l'expression devient :

$$E_\ell = Z\,m_\mathrm{p}\,c^2 + (A-Z)\,m_\mathrm{n}\,c^2 - m_\mathrm{X}\,c^2$$

où m_X, m_p et m_n sont les masses au repos respectivement du noyau, d'un proton et d'un neutron. Ainsi :

$$E_\ell = [Z\,m_\mathrm{p} + (A-Z)\,m_\mathrm{n} - m_\mathrm{X}]\,c^2.$$

L'expression entre crochets est la différence entre la masse au repos des nucléons et la masse au repos du noyau, différence appelée *défaut de masse.*

Définition *Pour un noyau ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, on constate un défaut de masse Δm positif :*

$$\boxed{\Delta m = Z\,m_\mathrm{p} + (A-Z)\,m_\mathrm{n} - m_\mathrm{X}}$$

En valeur relative, le défaut de masse est de l'ordre de 1 %. L'énergie de liaison s'exprime à l'aide du défaut de masse :

$$\boxed{E_\ell = \Delta m\,c^2}$$

Exemple 6.5 La masse d'un noyau d'hélium est $m_\mathrm{X} = 6{,}6446 \cdot 10^{-27}$ kg, celle de ses nucléons est $2\,m_\mathrm{p} + 2\,m_\mathrm{n} = 6{,}6951 \cdot 10^{-27}$ kg.
Le défaut de masse d'un noyau de hélium est $\Delta m = 5{,}05 \cdot 10^{-29}$ kg, soit 0,8 % de la masse du noyau. L'énergie de liaison vaut $E_\ell = 4{,}54 \cdot 10^{-12}$ J.

Remarque : l'énergie de liaison d'un nucléon libre est nulle.

Le schéma de la figure 6.6 montre les énergies de liaison des réactifs et des produits d'une réaction nucléaire exothermique. L'énergie de liaison des produits est supérieure à celle des réactifs et l'énergie libérée E peut s'écrire :

$$\boxed{E = E_\ell(\text{produits}) - E_\ell(\text{réactifs})}$$

Énergie de liaison par nucléon

L'énergie de liaison d'un nucléon particulier diffère d'un noyau à l'autre. En moyenne, elle est égale au rapport E_ℓ/A, appelé *énergie de liaison par nucléon.*

La figure 6.7 représente l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de masse. On constate que les noyaux légers et lourds présentent une énergie de liaison par nucléon plus faible que les noyaux moyens.

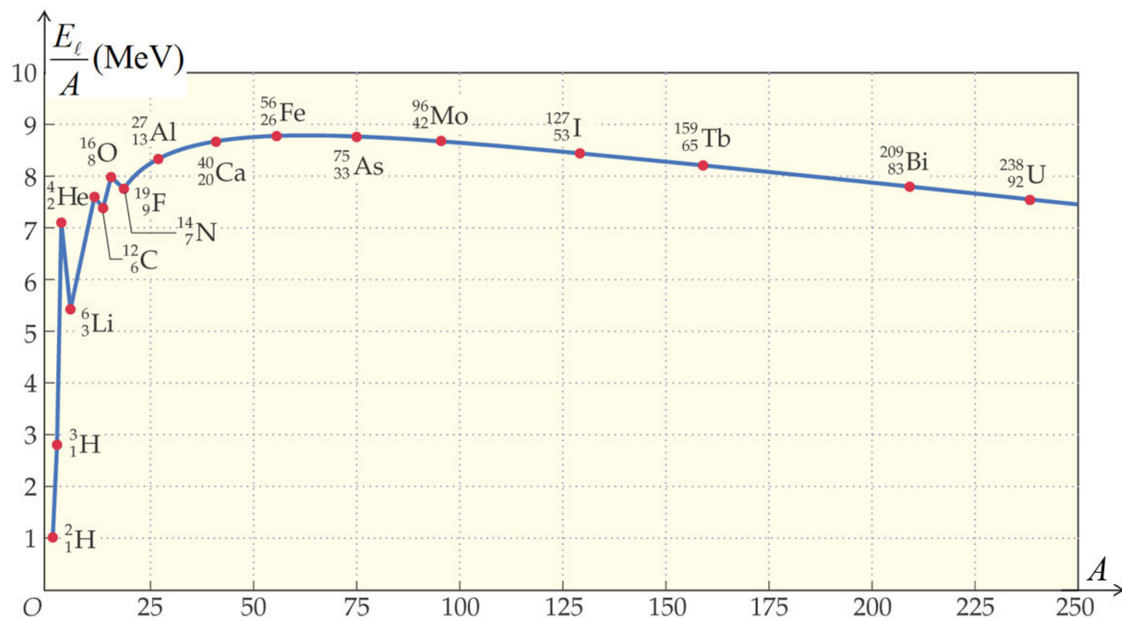


Figure 6.7 – Énergie de liaison par nucléon

Comme le nombre de nucléons ne varie pas lors d'une réaction nucléaire, il suffit que les énergies de liaison par nucléon des produits soient supérieures à celles des réactifs pour que la réaction soit exothermique.

De ce fait, si deux noyaux légers se soudent pour former un noyau moyen, la réaction appelée *fusion nucléaire* libère de l'énergie (figure 6.8). De même, lors de la réaction appelée *fission nucléaire*, au cours de laquelle un noyau lourd se casse en deux noyaux moyens, il y a libération d'énergie.

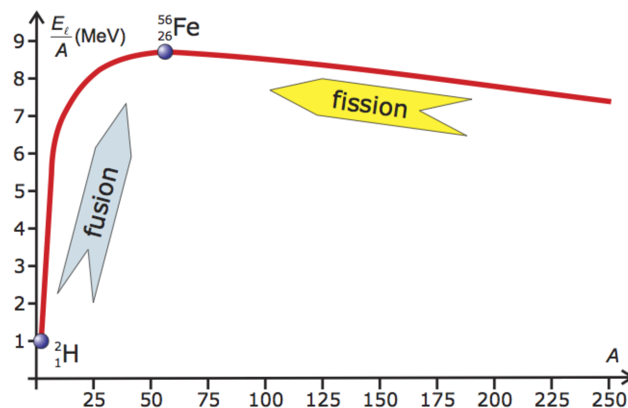


Figure 6.8 – Fusion de noyaux légers et fission d'un noyau lourd

6.3.3 La fission nucléaire

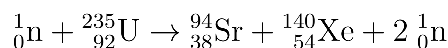
Principe et intérêt de la fission

La fission nucléaire est la rupture d'un noyau lourd *fissile* qui, sous l'impact d'un neutron, se divise en deux noyaux plus légers.

La plus connue des réactions de ce type est la fission de l'uranium 235 par absorption d'un neutron. Le noyau d'uranium se brise en deux noyaux plus légers accompagnés de deux ou trois neutrons, tout en libérant une énergie importante.

Bilan d'une réaction de fission

Une réaction possible de la fission du noyau d'uranium 235 est :



$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

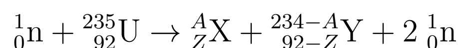
Comme pour toute autre transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de masse et du nombre de charge.

L'énergie libérée par cette réaction est :

$$\begin{aligned} E &= E_0(\text{réactifs}) - E_0(\text{produits}) \\ &= (m_\mathrm{n}\,c^2 + m_\mathrm{U}\,c^2) - (m_\mathrm{Sr}\,c^2 + m_\mathrm{Xe}\,c^2 + 2\,m_\mathrm{n}\,c^2). \end{aligned}$$

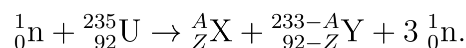
Remarque : un gramme d'uranium libère la même énergie que la combustion de 1,8 tonnes de pétrole.

La fission d'un noyau d'uranium peut donner différents noyaux plus légers (figure 6.9). L'équation générale d'une fission est :



$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{234-A}_{92-Z}\mathrm{Y} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

ou bien :



$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{233-A}_{92-Z}\mathrm{Y} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}.$$

Remarque : les noyaux X et Y sont souvent radioactifs β^- et émis dans un état excité et donnent alors lieu à l'émission de rayons γ.

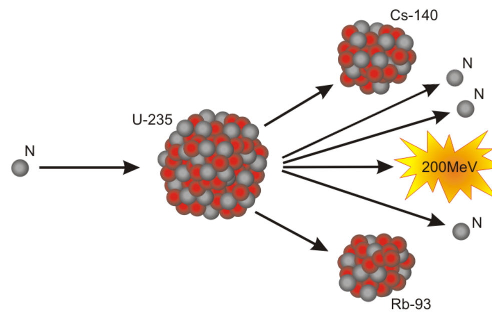


Figure 6.9 – Exemple d'une fission d'un noyau d'uranium

La réaction en chaîne

À la suite de la capture d'un neutron, un noyau fissile d'uranium 235 ou de plutonium 239 a subi une fission. Plusieurs neutrons accompagnent les produits de fission. Dans l'exemple de la figure 6.10, les trois neutrons secondaires provoquent trois nouvelles fissions, qui génèrent chacune trois neutrons de seconde génération, qui déclenchent à leur tour neuf fissions tertiaires. La réaction en chaîne prend un tour explosif, ce qui arrive dans une bombe atomique où la proportion de noyaux fissiles est très élevée.

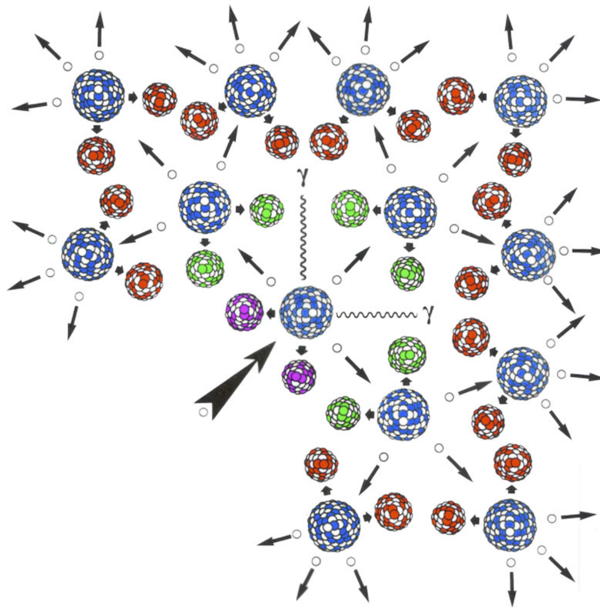


Figure 6.10 – Réaction en chaîne incontrôlée

Dans le cœur d'un réacteur où les noyaux fissiles ne dépassent pas 4 % et où beaucoup de neutrons se perdent en route, le nombre de neutrons entretenant la fission est exactement un et la réaction en chaîne s'entretient sans se développer.

6.3.4 Fusion nucléaire

Principe de la fusion

Une fusion nucléaire est une réaction au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent, c'est-à-dire fusionnent, pour en former un plus lourd, tout en libérant une énergie importante. Les

principales réactions de fusion se font à partir de l'hydrogène ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ et de ses deux isotopes, le deutérium ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ et le tritium ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$.

Bilan d'une réaction de fusion

Les figures 6.11 et 6.12 montrent deux exemples de réactions de fusion.

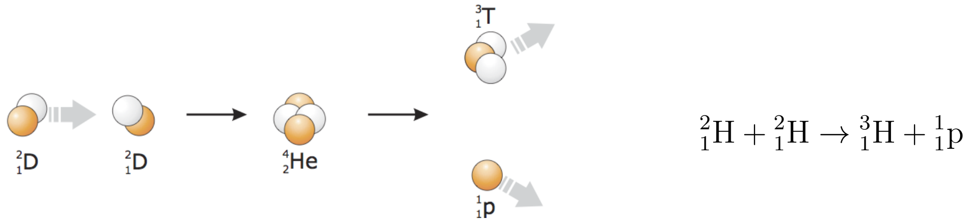


FIGURE 6.11 – Fusion nucléaire donnant du tritium

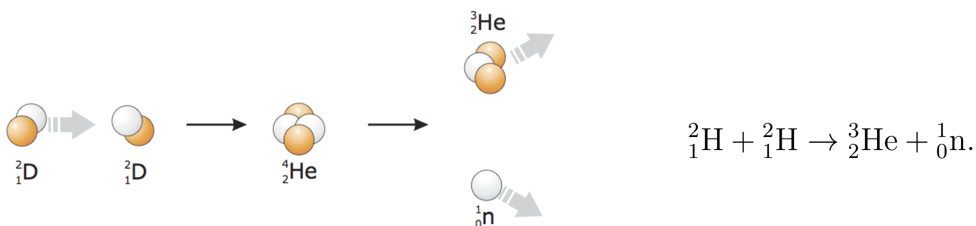
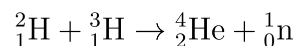


FIGURE 6.12 – Fusion nucléaire donnant un isotope de l'hélium

Comme pour toute autre transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de masse et du nombre de charge.

Pour la réaction de fusion :



$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

l'énergie libérée est :

$$\begin{aligned} E &= E_0(\text{réactifs}) - E_0(\text{produits}) \\ &= (m_{\,^{2}\mathrm{H}}\, c^2 + m_{\,^{3}\mathrm{H}}\, c^2) - (m_{\,^{4}\mathrm{He}}\, c^2 + m_{\mathrm{n}}\, c^2). \end{aligned}$$

Remarque : la fusion d'un gramme de tritium libère la même énergie que la combustion de 13,5 tonnes de pétrole.